

ЛЕКЦІЇ
з дисципліни «Теорія та технологія точної прокатки штаб»

ЛЕКЦІЯ 1
Основні поняття точної прокатки листів та штаб

ПЛАН ЛЕКЦІЇ

Вступ.

1. ПОПЕРЕЧНА РІЗНОТОВЩИННІСТЬ ШТАБ.
 - 1.1 Визначення товщини штаби (листа) при прокатуванні.
 - 1.2 Поперечна різнотовщинність штаб (листів).
 - 1.3 Формування поперечної різнотовщинності штаб.

ВСТУП

За останні роки відбулися суттєві зміни в технології та обладнанні листопрокатного виробництва, спрямовані головним чином на скорочення витрат металу, підвищення якості продукції. В галузі виробництва слябів практично повністю відмовляються від виробництва їх на слябінгах і блюмінгах-слябінгах, а застосовують машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Проектують та створюють великі товстолистові стани із довжиною бочки 3600...5500 мм при виробництві листів для багатотоннажного флоту і труб великого діаметру.

Для прокатки тонколистової сталі у гарячому стані застосовують стани з новими конструкціями клітей, які забезпечують безпрограмний процес виробництва штаб, пристрої та системи контролю і регулювання точності поперечного та поздовжнього профілів перерізів. Експлуатують литейно - прокатні агрегати (ЛПА) для отримання тонкої штаби із тонких слябів та рідкого металу.

Подальший розвиток отримало виробництво холоднокатаних штаб. З'явилися принципово нові рішення забезпечення прокатки високоточних і планшетних штаб на станах порулонної і безперервної прокатки. Впроваджуються суміщені лінії: травлення – прокатка, відпал – дресирування – обробка та інші. У сучасному цеху увесь процес від початку і до кінця керується обчислювальними машинами (КОМ), у які включені локальні системи керування окремими операціями.

Споживання листової продукції тим вище, чим значніший рівень індустріалізації та економічного розвитку країни. Наприклад, у США, Японії, ФРН доля листової продукції у загальному об'ємі виробництва прокату складає 55...67%. Найбільш висока доля споживання листового металу в електротехнічній промисловості, машинобудуванні для легкої та харчової промисловості, у автомобілебудуванні і у сільгосп-машинобудуванні і у суднобудуванні.

Товсті листи прокатують із зливків і слябів у гарячому стані на реверсивних станах з послідовним розташуванням 2-3-х клітей. Довжина бочок валків таких станів - $L = 2000...5500$ мм. На цих же станах прокатують і плити товщиною $h = 50...200$ мм. Товстолистову сталь з товщиною $h = 4...16$ мм і шириною до 2300 мм прокатують із слябів на станах з послідовним розташуванням клітей; на неперервних станах при температурах гарячої деформації ($1200...850^{\circ}\text{C}$). Тонколистову сталь з товщиною $h = 1,2...3,9$ мм у гарячому стані прокатують на неперервних широкоштабових станах, на реверсивних станах з пічними моталками і на планетарних станах. Тонколистову маловуглецеву сталь з $h = 0,5...2$ мм прокатують у холодному стані із гарячекатаних штаб у рулонах на неперервних (безперервних) і реверсивних станах з чотирьохвалковими клітьми. Штаби із легованої сталі – на реверсивних багатовалкових станах.

В різних галузях промисловості розширилось застосування тонких листів із спеціальними покриттями для виготовлення корозійностійких деталей

(оцинковані, освинцьовані, алюмінієвані листи), листову сталь з покриттям із полівінілхлориду, поліетилену та інш. органічних матеріалів. Із листової сталі в широких масштабах виготовляють зварні труби, гнуті профілі, предмети побутової техніки. Листову і штабову сталь отримують на станах гарячої та холодної прокатки, розмір яких характеризує довжина бочки валків. При цьому максимальна ширина листів (штаб) складає 0,85...0,9 від довжини бочки валків. Умовно листову продукцію розподіляють за товщиною (мм) на декілька груп: плити - > 50 ; товсті листи (штаби) - $4...50$; тонколистова сталь - $0,5...3,9$; жерсть - $0,08...0,36$; фольга - $< 0,07$.

Підвищення експлуатаційної стійкості прокатних валків і якості поперечного профілю штаб забезпечується застосуванням нових матеріалів для їх виготовлення, новими типами профілювань їх бочок і новими системами (способами) регулювання міжвалкового зазору.

1 ПОПЕРЕЧНА РІЗНОТОВЩИННІСТЬ ШТАБ

1.1 Визначення товщини штаби (листа) при прокатуванні

Прокатку плоского прокату (штаб, листів) здійснюють в основному в клітках кварто, що містять опорні і робочі валки. Для зниження сили прокатки діаметр робочих валків завжди в 2...3 разу менше діаметру опорних валків. Для отримання необхідної товщини штаби заздалегідь перед початком прокатки між робочими валками встановлюють відповідний початковий зазор. Початковий зазор завжди менше фактичної товщини штаби на величину пружини (пружній деформації) кліті.

Дійсно, під дією сили прокатки деталі прокатної кліті пружно деформуються (стійки піддаються розтягуванню, подушки, підшипники, натискні гвинти, гайки - стискаються), усуваються зазори в системі натискний гвинт-подушки. Розмір і форма зазору між робочими валками змінюються в порівнянні з початковими, а отримана штаба придбаває відповідні товщину і поперечну різнотовщинність.

Визначення товщини штаби на виході з кліті виконують з використанням роботи [1]. Сумарна пружна деформація (пружина) робочої кліті пропорційна величині сили прокатки і може бути визначена дослідним або теоретичним шляхом. При дослідному визначенні пружини кліті вимірюють початковий зазор між валками, товщину штаби після прокатки і силу при прокатуванні серії штаб. Побудувавши залежність $P = f(\delta_{кл})$ можна визначити жорсткість кліті (рис. 1.1) (де $\delta_{кл}$ - пружна деформація кліті). Величина початкового зазору спільно з величиною пружної деформації кліті визначають товщину кінцевої штаби h

$$h = S_0 + S_1 + P/M_{кл}, \quad (1.1)$$

де S_0 - початковий зазор між валками в ненавантаженому стані кліті; S_1 - сума початкових зазорів в контактах системи робочий валок - натискний гвинт; P - сила прокатки; $M_{кл}$ - модуль жорсткості кліті.

Сума ($S_1 + P/M_{\text{кл}}$) називається пружиною кліті. Модуль жорсткості кліті $M_{\text{кл}}$ є тангенс кута α (рис.1.1) пружній лінії робочої кліті і визначається з лінійного рівняння з використанням експериментальних даних P і $\Delta\delta_{\text{кл}}$ (МН/мм)

$$M_{\text{кл}} = \operatorname{tg} \alpha = \Delta P / \Delta \delta_{\text{кл}} = P / \delta_{\text{кл}}, \quad (1.2)$$

де $\Delta\delta_{\text{кл}}$ - приріст пружної деформації кліті при зміні сили на величину

$$\Delta P = P - P_0.$$

Модуль жорсткості кліті з формули (1.2) відповідає повній величині пружної деформації кліті при дії сили

$$\delta_{\text{кл}} = P / M_{\text{кл}}, \quad (1.3),$$

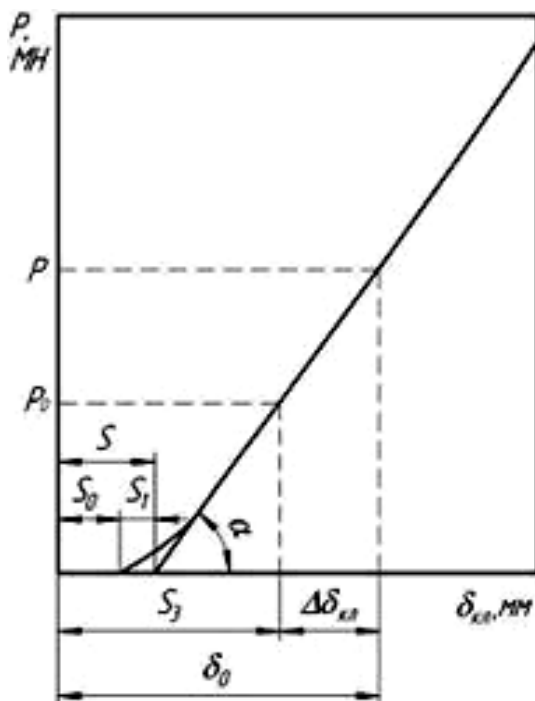
де P - сила, діюча на кліть; P_0 - деяке менше значення сили; $\delta_{\text{кл}}$ - повна пружна деформація кліті..

Позначимо загальний проміжок в системі робочі валяння - натискний гвинт $S = S_0 + S_1$ і запишемо лінійну залежність між P і h (з урахуванням формули (1.1)) у виді

$$h = S + \delta_{\text{кл}} = S + P / M_{\text{кл}}. \quad (1.4)$$

Це рівняння носить назву рівняння Сімса – Головіна і дозволяє визначити можливу товщину штаби після прокатки..

Так, наприклад, при силі прокатки $P=10\text{МН}$, модулі жорсткості кліті 4МН (паспортні дані), зазорі $S=0$ і повній пружній деформації кліті з формули (1.3) $\delta_{\text{кл}}=2,5\text{мм}$ в даному випадку можна отримати штабу з мінімальною товщиною $h=2,5\text{мм}$. Якщо збільшимо зазор до $S=+1\text{мм}$, отримаємо штабу завтовшки $h>2,5\text{мм}$, а якщо зменшимо зазор на $S=-1,0\text{мм}$, то отримаємо штабу завтовшки менше $2,5\text{мм}$ (валки стислі в «забій»).



Експериментально і теоретично встановлені питомі складові пружній деформації кліті (%) :

валкова система	- 50 - 70 ;
станина	- 15 - 20;
підшипники	- 10 - 15;
натискний вузол	- 10 - 15;
інші деталі	- до 10.

Рисунок 1.1 - Залежність між силою P і пружиною кліті

Як впливає з рис.1.1 в початковий період навантаження кліті при початковому зазорі відбувається вибірка зазорів S в деталях кліті при нелінійній зміні нормальної сили. Надалі, збільшення сили P викликає лінійне

зростання пружної деформації кліті ($\delta_{кл}$). Як впливає з дослідних даних, найбільшу деформацію отримують валки внаслідок прогину і сплюснення на міжвалковим контакт, просідання опорних валків (переміщення у вертикальній площині). Установочний (початковий) зазор S може мати наступні величини: $S = 0$; $S > 0$; $S < 0$. Співвідношення $S > 0$ дійсно при прокатуванні товстих і середніх по товщині штаб, коли товщина штаби більше величини пружної деформації кліті, а інші співвідношення ($S=0$ і $S<0$) – при прокатуванні тонких штаб..

Так, в умовах холодної прокатки, як правило, $S < 0$. В цьому випадку, під дією натискних гвинтів (плунжера гідропрстрою) валки при їх обертанні стискаються «в забій» і тоді маємо (рис.1.1)

$$\Delta\delta_{кл} = \delta_0 - S_3 = \frac{P}{M_{кл}} - \frac{P_0}{M_{кл}} = \frac{P - P_0}{M_{кл}}. \quad (1.7)$$

де S_3 - попередній «забій» валків; δ_0 - сумарна деформація кліті; P_3 - сила при стискуванні валків.

Ця формула і визначає товщину після прокатки в заздалегідь стислих валках

$$h = \Delta\delta_{кл} = \frac{P - P_0}{M_{кл}}. \quad (1.8)$$

Формули (1.4) і (1.8) дають можливість визначити товщину штаби за наявності експериментальних даних S , P і P_0 (при відомому значенні $M_{кл}$). Модуль жорсткості кліті залежить від розмірів стана і ширини штаби і за даними різних досліджень для клітей неперервних станів гарячої прокатки рівний ($M_{кл}$, МН/мм)[31]:

стан 1700 - КарМК - 3,6 ... 3,9;
стан 2000 - НЛМК - 5,5 ... 6,0;
стан 1680 - ЗМК - 3,06 ... 3,62.

Модулі жорсткості клітей неперервних станів холодної прокатки дорівнюють ($M_{кл}$, МН/мм) [31]:

стан 1700 КарМК - 4,2;
стан 1200 НЛМК - 4,2 . 4,5;
стан 1680 ЗМК - 3,06 . 3,16;
стан 1700 (проект)- 5,18 . 5,8;

Примітка: КарМК - Карагандинський меткомбінат; НЛМК - Новолипецькій меткомбінат; ЗМК - меткомбінат "Запоріжсталь".

Більші значення $M_{кл}$ відповідають максимальній ширині штаби для цього стана. Чим більше величина модуля жорсткості кліті, тим менше вертикальна пружна деформація кліті і зміна міжвалкового зазору.

1.2 Поперечна різнотовщинність штаб (листів)

Готову продукцію у вигляді штаб завтовшки $h=0,4...16\text{мм}$ випускають в рулонах на неперервних і реверсивних станах, а листи завтовшки $h=4...60\text{мм}$ і довжиною $L=10...60\text{м}$. У гарячому стані прокатують штаби завтовшки $h=1...16\text{мм}$ на широкоштабових станах гарячої прокатки (ШСГП), працюючих самостійно або в складі з ливарно-прокатними агрегатами (ЛПА)) [3,4]. Штаби прокатують в клітях кварто в робочих валках діаметром $620...800\text{мм}$ (в чистових групах) і з опорними валками діаметром $1200...1600\text{мм}$.

Робочі валки виготовляють з легованого чавуну з вибіленим шаром і твердістю до 80 HSD (по Шору) (чистова група) або із спеціальних сталей (чорнова група), а опорні - з легової сталі [4-6].

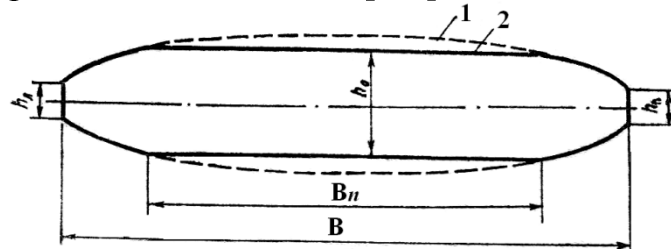


Рисунок 1.2- Від поперечної різнотовщинності штаби при гарячому 1 та холодному 2 прокатуванні

При прокатуванні в кожній кліті форма поперечного перерізу штаби відрізняється від прямокутної. Як правило штаба отримує опуклий поперечний переріз (рис.1.2), але при порушенні налаштування валків можливе отримання і клиновидної форми штаби. Проте останній варіант не є характерним.

Поперечна різнотовщинність штаби формується при гарячому прокатуванні штаб (листів) і величина її визначається, при різній товщині кромок, таким чином

$$\delta h_{\Pi} = h_c - 0,5(h_l + h_{\Pi}), \quad (1.9)$$

де h_c - товщина штаби по вісі ; h_l і h_{Π} - товщина левої і правої кромок відповідно на відстані 40 мм від кромки.

У загальному випадку величина поперечної різнотовщинності δh_{Π} не повинна перевищувати плюсовий допуск по товщині тонкої штаби (листа) (до $5...8\%$ від її товщини). Для листів завтовшки $5,5...12\text{мм}$ плюсовий допуск складає $4,5...2,5\%$, а мінусовий - $11,5...6,5\%$. Під плюсовим допуском розуміють величину відхилення від заданої (номінальної) товщини штаби (листа) при прокатуванні у бік її збільшення

$$h = h_{\Pi} \pm \Delta,$$

де h_{Π} - номінальна товщина штаби (листа); Δ - допуск по товщині: (+) - позитивний допуск, (-) - мінусовий допуск.

У практичних умовах на ШСГП переважно прокатують штаби з товщиною по мінусовому допуску при збереженні обмеженої її поперечної різнотовщинності. Позитивною стороною прокатки штаб на мінус являється забезпечення в подальшому зниження маси машин і побутових виробів, які

виготовляються з них, . Проте при прокатуванні штаб на мінус збільшується час прокатки за рахунок збільшення довжини готової штаби, а отже, знижується продуктивність стана.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при гарячому прокатуванні тонких штаб (2...4мм) поперечна різнотовщинність знаходиться в межах 0,02...0,08мм, але штаби, що йдуть на подальшу холодну прокатку, в усіх випадках повинні мати поперечну різнотовщинність не вище $\delta h_{\Pi}=0,03...0,05\text{мм}$, що забезпечує сприятливі умови отримання холодно-катаних штаб.

1.3 Формування поперечної різнотовщинності штаб

Вище відмічали, що гарячу і холодну прокатку штаб виконують, як правило, в чотиривалкових клітках (клітках кварто) з опорними і робочими валками. При прокатуванні штаб в робочих валках відбуваються зменшення товщини штаби, вигин опорних валків і пружні деформації робочих валків. Пружні деформації робочих валків включають прогин спільно з опорним валком і власний прогин - пружну деформацію у контакті із штабою.

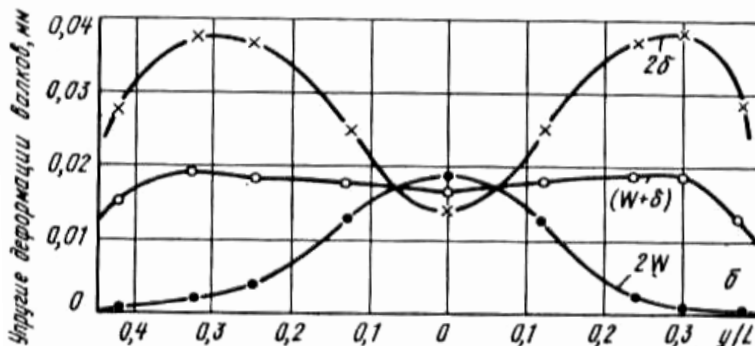
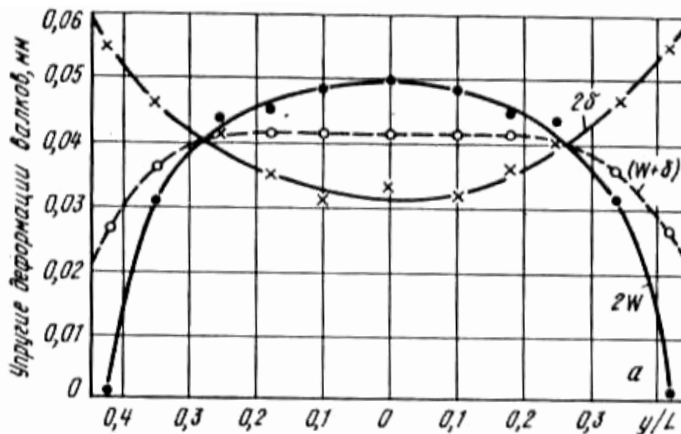


Рисунок 1.3 - Пружні деформації валків при прокатуванні штаб: а- $H=1,5\text{мм}$ (дресирувальний двохвалковий стан 1700, діаметр валків 900мм, ширина штаби $B=1250\text{мм}$, матеріал штаб сталь марки 08кп); б- $H=1,88\text{мм}$ (двохвалкова кліть 350, діаметр валків 250мм, ширина штаби $B=200\text{мм}$, довжина 350мм, матеріал штаб дюралюміній марки Д16)

На рис.1.3,а представлені результати досліджень параметрів пружних деформацій валків дресирувальній кліті 1700 ПАО

«Запоріжсталь», отриманих при прокатуванні сталевих листів з дюралюмінієвими вставками (кінцева товщина штаби $h=1,43...1,46\text{мм}$, відносне обтиснення $\varepsilon=2,3...4,5\%$) і двохвалковій кліті 350 при прокатуванні листів з дюралюмінію (кінцева товщина $h=1,37...1,41\text{мм}$, $\varepsilon=25...27\%$) з м'якими свинцевими вставками [7-10]. Характеристики пружних деформацій

представлені залежно від відносної ширини штаби y/B .

Дослідження дозволили встановити фактичний характер пружних деформацій валків безпосередньо у контакті зі штабою (рис.1.3). Як впливає з отриманих даних, в обох випадках максимальне значення прогину двох валків $2W$ відповідає середині ширини B штаби і складає $2W \approx 0,05 \text{ мм}$. у першому випадку ($B/L=0,74$) і $2W \approx 0,02 \text{ мм}$ ($B/L=0,57$) в другому випадку. Наявність прогину призводить до збільшення міжвалкового зазору і поперечної різнотовщинності штаби. .

Одночасно з прогином відбувається радіальне пружне стискування 2δ двох валків, яке порівняно з величиною прогинів, і нерівномірно по ширині штаби (рис.1.3). Ця нерівномірність обумовлена характером розподілу по ширині штаби відносного (абсолютного) обтиснення і отже, середнього нормального контактного напруження, а також погонних сил на контакті (МН/см)

$$p_i = \frac{P_i}{B_i}, \quad (1.10)$$

де P_i - сила на невеликій ділянці шириною B_i контакту штаби з валком.

При деформації широкої штаби ($B/L=0,74$) (рис.1.3,а) пружне стискування валків максимальне на крайових ділянках листа, що обумовлено затисканням їх при прогині валків і, разом з цим, збільшенням обтиснення кромки при одночасному підвищенні нормального контактного напруження (погонних сил).

Мінімальні обтиснення, погонні сили і пружні деформації валків мають місце в середині ширини листа, де параметр 2δ дорівнює всього $2\delta \approx 0,03 \text{ мм}$, що істотно менше його власного прогину ($2W=0,05 \text{ мм}$). Активна твірна валків на контакті з листом, що формує поперечну різнотовщинність листа, визначається по формулі (для одного валка)(мм)

$$\delta_{Ai} = W_i + \delta_i, \text{ мм.}$$

З рис.1.3,а видно, що контур поперечного перерізу листа відповідає параболі вищого порядку (рис.1.3, крива 2), а поперечна різнотовщинність листа складає $\delta h_{\Pi} = 2\delta_A \approx 0,02 \cdot 2 = 0,04 \text{ мм}$.

Інші закономірності зміни досліджуваних параметрів мають місце при деформації листа шириною $B=200 \text{ мм}$ ($B/L=0,57$) (рис.1.3,б). По-перше, пружне сплюснення (2δ) змінюється по опукло-увігнутій кривій з максимумом при $y/B=0,6$. На середній ділянці ширини листа ($y/B < 0,6$) параметр 2δ зменшується у зв'язку зі зменшенням обтиснення і погонних сил, як і на рис.1.3,а. Максимум параметра 2δ обумовлений підвищенням нормальних контактних напружень внаслідок затискання металу валками і збільшення обтиснення.

Зниження параметра 2δ на ділянці $y/B > 0,6$ обумовлено зменшенням погонних сил внаслідок появи поперечної течії металу, зменшення

коефіцієнту витягання i , отже, появи напружень розтягування на кромках листа, що призводить до зменшення нормальних контактних напружень [11]. Увігнута крива прогину валка ($2W$), на наш погляд обумовлена високою жорсткістю опорного вузла в цій кліті, коли кінцеві ділянки валків практично не переміщаються. Активна твірна валка ($\delta_A < 0,01\text{мм}$) має форму, близьку до параболи вищого порядку, і формує поперечну різнотовщинність листа в межах $\delta h_{\Pi} \approx 0,015\text{мм}$.

Таким чином, поперечна різнотовщинність штаби в осередку деформації формується нерівномірністю розподілу обтиснень по її ширині, що викликає нерівномірний розподіл по ширині середнього нормального напруження і погонних сил, що визначають параметри активної твірної і поперечну різнотовщинність штаби. У свою чергу нерівномірність розподілу обтиснень по ширині штаби залежить в основному від наступних чинників:

- величини сили прокатки;
- діаметром і довжиною бочки валків, тобто від величини прогину валків;
- мірою вироблення валків;
- величиною і формою профілювання валків;
- поперечній різнотовщинністю штаби до прокатки;
- нерівномірністю розподілу температури по ширині штаби.